

Modelo caótico para a intermitência global na camada limite atmosférica estável

Felipe Denardin Costa, Otávio Costa Acevedo,
José Carlos Merino Mombach

*Departamento de Física/CCNE/UFSM/CRS/INPE/Santa Maria, RS - Brasil
e-mail: fdenardin@gmail.com*

1. Introdução

A partir do trabalho pioneiro de Lorenz (1963), um grande número de estudos tem mostrado a ocorrência de comportamento caótico em diferentes tipos de sistemas físicos, químicos e biológicos. Sistemas atmosféricos também apresentam comportamento caótico sendo através de modelos baseados em equações prognósticas, ou através da análise de séries temporais de variáveis turbulentas. A complexidade do escoamento atmosférico, junto à superfície, é particularmente aumentada no período noturno em condições muito estáveis, quando ocorre o fenômeno chamado intermitência global.

Neste trabalho é apresentado um modelo de camadas baseado em equações prognósticas para o número de Richardson, energia cinética turbulenta e cisalhamento do vento, capaz de reproduzir os eventos intermitentes que ocorrem na camada limite atmosférica (CLA) noturna estável e que também apresenta características presentes em sistemas caóticos.

2. Modelo

Negligenciando os efeitos da advecção horizontal, da divergência horizontal do fluxo turbulento, da rotação da Terra e do aquecimento diabático, pode-se chegar a equações prognósticas para o número de Richardson (1), energia cinética turbulenta (2) e cisalhamento do vento (3) (Costa, 2009):

$$\frac{\partial Ri_i}{\partial t} = \frac{Ri_i}{S_i} \left[\frac{m(m-1)}{h^2} u_{*i}^2 - 2 \frac{\partial S_i}{\partial t} \right] \quad (1)$$

Onde: Ri é o número de Richardson, h é a altura da CLA, S é o cisalhamento do vento, u_* é a velocidade de fricção e m é a curvatura do perfil vertical do fluxo de calor sensível.

$$\frac{\partial \bar{e}}{\partial t} = -\text{Ri} S u_{*i}^2 + S_i u_{*i}^2 - \frac{T_{i+1} - T_{i-1}}{2\Delta z} - \frac{u_{*i}^3}{z_i} \quad (2)$$

Onde T é fluxo vertical de energia cinética. A velocidade de fricção é calculada diretamente a partir da energia cinética turbulenta (\bar{e}) pela expressão: $u_* = \sqrt{\bar{e}/3}$.

$$\frac{\partial S_i}{\partial t} = \frac{P}{z_i} + \frac{u_{*i+1}^2 - u_{*i}^2}{\Delta z} \quad (3)$$

Onde P é o forçante mecânico relacionado com o vento no topo da CLA U , $P = fU$, onde f é o parâmetro de Coriolis assumido como 10^{-4} s^{-1} .

O número de níveis assumidos, para as simulações, são sete níveis, em função da análise espectral que mostra a convergência qualitativa dos resultados do modelo para um número de níveis maior que sete (figura não apresentada aqui). O nível inferior do modelo é assumido como sendo $5m$ e os demais níveis são igualmente espaçados até o topo da CLA.

3. Resultados

- Características básicas do modelo

Os resultados do modelo são sensíveis ao número de níveis usados, e também às constantes presentes no modelo (b , m). Entretanto, o comportamento do modelo pode ser entendido baseado na análise da dependência de tal com a velocidade do vento no topo da CLA (Figura 1).

Na figura 1 é possível observar que para $U=0.2m/s$ (Figura 1-a) a ocorrência dos eventos intermitentes é periódica e com pequena intensidade. À medida que a velocidade do vento aumenta a intensidade da turbulência também aumenta assim como a complexidade das soluções, a qual pode ser observada pela imprevisibilidade das ocorrências dos eventos intermitentes. Além disso, a duração dos eventos intermitentes aumenta com o acréscimo do vento no topo da CLA (Figura 1-b, c, d).

Lorenz (1963) mostrou que mudanças muito pequenas nas condições iniciais podem levar a soluções completamente diferentes para o seu modelo. Este resultado é uma consequência da propagação de pequenas perturbações em sistemas caóticos, que consiste em uma das principais características de tais sistemas, a sensibilidade às condições iniciais. A Fig. 2 é mostrada como uma perturbação de $1mm/s$ em U pode mudar completamente a solução (Fig. 2 painel inferior da direita), enquanto que a mesma perturbação não altera em nada a solução do siste-

ma (Fig. 2 painel central da direita) ou altera pouco (fig. 2 painel superior da direita).

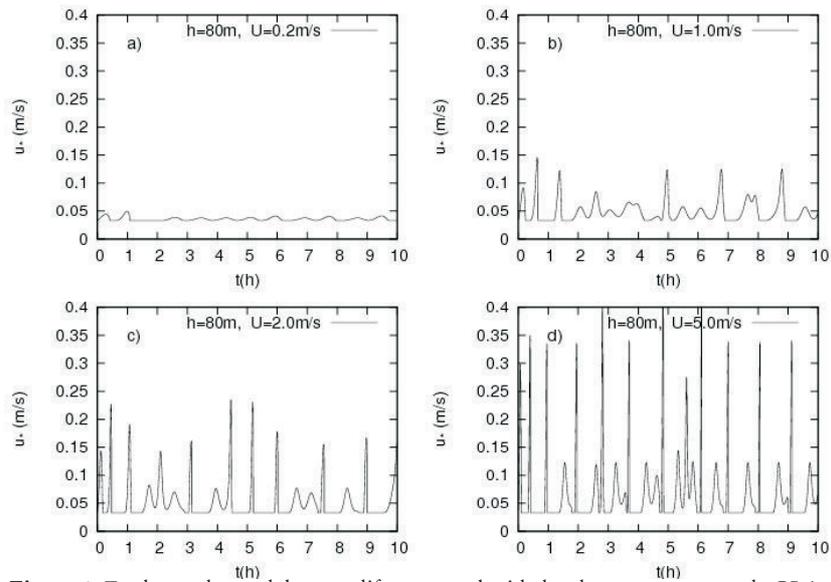


Figura 1. Evolução do modelo para diferentes velocidades do vento no topo da CLA, com $h=80\text{m}$ e $m=4$.

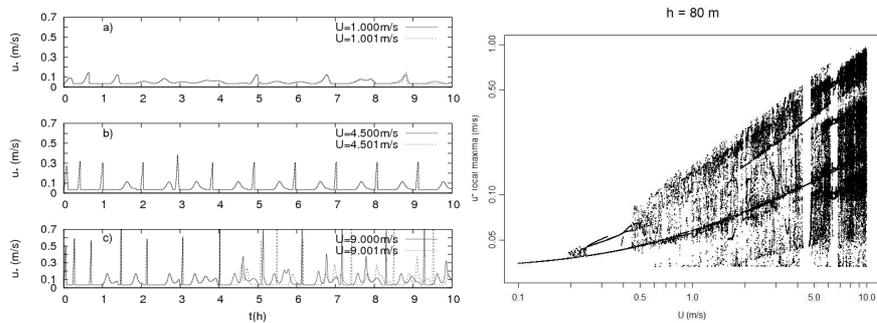


Figura 2. Sensibilidade às condições iniciais do modelo. Com $h=80\text{m}$ e $m=4$ (esquerda). Diagrama de bifurcação para diferentes valores de U . Com $h=80\text{m}$ e $m=4$ (direita).

Uma forma de relacionar as possíveis soluções em função de um determinado parâmetro externo é através de um diagrama de um diagrama de bifurcações (Fig. 3- painel da esquerda).

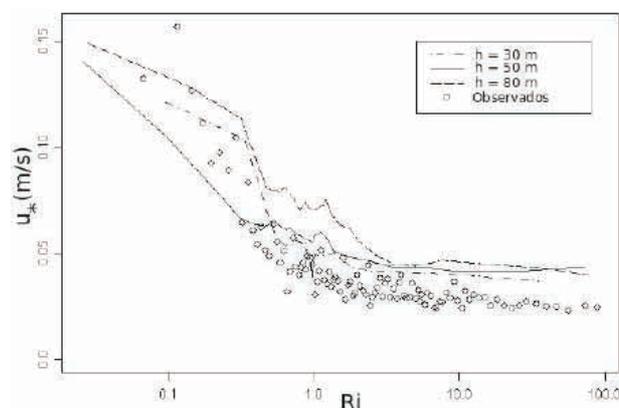


Figura 3. Relação $u_* \times Ri$. Comparação entre dados experimentais e resultados do modelo.

4. Conclusões

O modelo apresentado é capaz de reproduzir a imprevisibilidade das ocorrências dos eventos intermitentes na CLA estável. Tal modelo apresenta características caóticas tais como sensibilidade as condições iniciais como pode ser visto também em um diagrama de bifurcações das soluções do modelo. Além disso, as soluções do modelo apresentam boa concordância com dados experimentais na relação entre u_* e Ri (Fig. 3). O que representa um grande resultado já que o modelo não é constituído por nenhuma formulação de turbulência que assuma que a relação entre u_* e Ri tenha um perfil alongado, sendo este um resultado que surge naturalmente.

Agradecimentos

Os autores agradecem as agencias CAPES e CNPq pelo auxilio.

5. Referências Bibliográficas

COSTA, F.D. Caos na Camada Atmosférica Noturna. **Dissertação de Mestrado**. Programa de Pós Graduação em Física- Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2009.

LORENZ, E.N.: Deterministic Nonperiodic Flow. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 20, p. 130–141, 1963.